

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO, CAMPUS SUR

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis previa a la obtención del Título de: INGENIERA AMBIENTAL

TEMA: MODELO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO
DEL VERTEDERO A VORTICE

AUTORA: VERONICA ALEXANDRA CALERO ALMEIDA
DIRECTOR: ING. MIGUEL ARAQUE

QUITO, FEBRERO DEL 2012

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados, han sido consultados en las referencias bibliográficas y las conclusiones que se encuentran en este documento, son de exclusiva responsabilidad de la autora: Verónica Alexandra Calero Almeida

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido.

Quito, Febrero 2012

Verónica Calero Almeida

CERTIFICACIÓN

Certificó que el presente trabajo fue desarrollado por Verónica Alexandra Calero Almeida bajo mi supervisión.

Prof. Ing. Miguel Aráque
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al final de una etapa más de mi vida quiero agradecer primeramente a Dios y la Purita por haberme acompañado, bendecido y guiado durante cada día.

Les doy gracias a mi Señor padre Arturo y Señora madre Consuelo, a mis hermanos Lorena y Lenin por haberme apoyado, por haber creído en mí y ayudarme a salir adelante siempre, permitiéndome llegar hasta el final.

A la persona que me permitió conocer el significado de amor, amistad y compañía.

A mi Director de Tesis el Ingeniero Miguel Araque por ser un buen amigo y docente, a todos los profesores de la carrera por sembrar conocimientos y valores durante toda mi formación profesional.

A un tío en especial quien me enseñó a tener coraje y fuerza para poder empezar de nuevo, me ayudo a creer en mí otra vez.

A toda la familia que creyó en mí y a todas las personas que me aprecian, MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios y a la Purita por haberme bendecido, cuidado y dado fuerzas para dejar de lado algunos problemas de salud y poder culminar una etapa más de mi vida.

A mi padre Arturo por comprenderme y darme fuerzas para empezar de nuevo, por enseñarme el significado de llevar el pan de cada día al hogar, por su fuerza diaria

A mi madre Consuelo por ser mi gran confidente incondicional y mi guía, por enseñarme a ser valiente y a luchar por lo que quiero.

A mis hermanos Lore y Lenin por estar conmigo en todo momento, por cuidarme siempre, apoyarme y seguir creyendo en mí incondicionalmente.

A David por acompañarme en un sueño hecho realidad, por permitirme descubrir a su lado la posibilidad de amar.

V. C. A

Contenido

1	CAPITULO I.....	1
1.	TEORIA DEL MODELADO HIDRÁULICO	1
1.1	ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA EL CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN 1	
1.2	ANTECEDENTES HISTORICOS DE MODELOS HIDRAULICOS.....	1
1.3	OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA	2
1.4	LA MODELACIÓN HIDRÁULICA:.....	4
1.4.1	Posibilidades de la modelación hidráulica	5
1.5	MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA	6
1.6	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS REQUERIDAS A LA ENTRADA Y AL PIE DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN	7
1.7	SEMEJANZA GEOMÉTRICA, CINEMÁTICA Y DINÁMICA.....	8
1.7.1	Semejanza geométrica.....	8
1.7.2	Semejanza cinemática.	9
1.7.3	Semejanza dinámica.....	10
1.8	PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....	11
1.8.1	Relación de las fuerzas de inercia a las de presión.....	11
1.8.2	Relación de las fuerzas de inercia a las viscosas.....	11
1.8.3	Relación de las fuerzas de inercia a las gravitatorias.	12
1.8.4	Relación de las fuerzas de inercia a las elásticas.....	12
1.8.5	Relación de las fuerzas de inercia a las de tensión superficial	12
1.9	TEOREMA II DE BUCKINGHAM.....	13
1.10	CONDICIONES DE SIMILITUD	14
1.11	SIMILITUD DE REYNOLDS.....	14
1.12	SIMILITUD DE FROUDE	15
1.13	ESCALA EN MODELOS HIDRAULICOS.....	16
1.13.1	Efectos de escala	17
1.14	TIPOS DE MODELOS HIDRAULICOS.....	17
1.14.1	Modelodefondomóvil.....	18
1.14.2	Modelos de fondo fijo	18
2	CAPITULO II	19
2.1	OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN..	19
2.2	OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA	19
2.3	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	19

2.4	SIMILITUD Y SELECCIÓN DE LA ESCALA DEL PROYECTO.....	19
2.5	DESCRIPCIÓN DEL MODELO EN EL LABORATORIO	20
3	CAPITULO III.....	29
3.1	GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PLUVIAL O COMBINADO.....	29
3.1.1	Pozo con caída libre	30
3.1.2	Canal de pendiente fuerte con lecho disipador.....	30
3.1.3	Vertedero a Vórtice	30
3.2	OBJETIVOS DE LA DISPOSICIÓN DEL VERTEDERO A VORTICE	31
3.3	DEFINICIONES Y CARACTERISTICAS DE TIPOS DE VERTEDEROS A VORTICE	34
3.3.1	Canal o colector de entrada	35
3.3.2	Cámara de entrada.....	35
3.3.3	Dimensionamiento del pozo vertical.....	39
3.3.4	Dimensionamiento de la cámara de disipación	40
3.4	CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO VÓRTICE	41
3.4.1	Datos Previos	41
3.4.2	Dimensionamiento de cámara de entrada y tubo vórtice	41
3.4.3	Dimensiones de la cámara de disipación al pie del pozo vertical	43
3.4.4	Tubo vertical o pozo.....	43
3.4.5	Cámara de disipación al pie	45
3.4.6	Colector de entrega	47
4	CAPITULO IV.....	48
4.1	SISTEMA DE MEDICION Y TOMA DE DATOS	48
4.2	PLAN DE PRUEBAS	48
4.3	DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LABORATORIO	49
4.3.1	Ensayo de laboratorio #1:.....	49
4.3.2	Ensayo de laboratorio #2:.....	50
4.3.3	Ensayo de laboratorio #3:.....	51
4.4	ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	52
4.4.1	Tanque de carga y Cámara de entrada	52
4.4.2	Tubo vertical	52
4.4.3	Cámara de disipación al pie	52
5	CAPITULO V	53

5.1	CONCLUSIONES	53
5.2	RECOMENDACIONES.....	54

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

<i>Gráfico 1 Laboratorio de Hidráulica</i>	<i>20</i>
<i>Gráfico 2 Mesa de trabajo</i>	<i>21</i>
<i>Gráfico 3 Tanque superior</i>	<i>21</i>
<i>Gráfico 4 Vertedero a vórtice</i>	<i>22</i>
<i>Gráfico 5 Vertedero a vórtice en posición final</i>	<i>22</i>
<i>Gráfico 6 Vertedero a vórtice posición frontal</i>	<i>23</i>
<i>Gráfico 7 Bomba de recirculación</i>	<i>23</i>
<i>Gráfico 8 Cuenco de disipación</i>	<i>24</i>
<i>Gráfico 9 Válvula de control</i>	<i>24</i>
<i>Gráfico 10 Adecuaciones de la tubería</i>	<i>25</i>
<i>Gráfico 11 Vista panorámica del vertedero a vórtice</i>	<i>25</i>
<i>Gráfico 12 Vista panorámica vertedero a vórtice</i>	<i>26</i>
<i>Gráfico 13 Tanque superior de carga</i>	<i>26</i>
<i>Gráfico 14 Tanque de dosificación</i>	<i>27</i>
<i>Gráfico 15 Tanque de recogida</i>	<i>27</i>
<i>Gráfico 16 Modelaje hidráulico vertedero a vórtice</i>	<i>28</i>
<i>Gráfico 17 Cambios bruscos de nivel</i>	<i>29</i>
<i>Gráfico 18: Elementos de un vertedero a vórtice</i>	<i>33</i>
<i>Gráfico 19 Tipos de unión de colectores</i>	<i>34</i>
<i>Gráfico 20 Línea de energía en cámara de entrada</i>	<i>36</i>
<i>Gráfico 21 Geometría de la Cámara de entrada</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 22 Geometría de la cámara de disipación</i>	<i>40</i>
<i>Gráfico 23: Cámara de disipación al pie</i>	<i>46</i>
<i>Gráfico 24: Variantes para mejorar la disipación de energía</i>	<i>47</i>

1 CAPITULO I

1. TEORIA DEL MODELAJE HIDRÁULICO

1.1 ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA EL CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN

Las características especiales de topografía que presentan las ciudades andinas plantean ciertos problemas en cuanto al diseño de obras, para los sistemas de alcantarillado, con cambios simultáneos de nivel y de dirección del flujo con superficie libre.

En ciudades como Quito, las zonas residenciales, cada vez alcanzan niveles más críticos de ubicación provocando el dilema de encontrar soluciones técnicas y económicas que permitan la conducción de las aguas, salvando grandes desniveles con desarrollos longitudinales mínimos de la obra.

En estos casos, las recomendaciones de diseño, sugieren ubicar pendientes longitudinales mínimas en la conducción, que den lugar a velocidades por debajo de las admisibles para luego diseñar estructuras especiales de salto que permitan disipar la energía potencial debida al desnivel. En una gran mayoría de casos se trata de alturas mayores a los 2.00 m.

La acción del agua sobre los materiales que pueden ser ecotado mediante el correcto diseño de sus estructuras.

1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DE MODELOS HIDRAULICOS

El aprovechamiento del agua por parte del hombre marcó la diferencia fundamental para cambiar su forma de vida originalmente nómada transformándola en el inicio de las civilizaciones. Sin embargo, hace apenas dos siglos el hombre ha sido capaz de fundamentar la Hidráulica en el conocimiento científico inter- y multidisciplinario. En la actualidad existe un buen conocimiento teórico y experimental de los fenómenos hidráulicos más frecuentes. Sin embargo el permanente desarrollo de la humanidad,

tanto en el ámbito urbano como rural, impone cada vez nuevos retos y nuevas restricciones en la implementación de novedosas obras hidráulicas requeridas para la solución de los problemas en el sector de saneamiento básico.

El ejercicio de la ingeniería requiere, por lo tanto, una permanente y sistemática observación de los fenómenos hidráulicos, sea en la naturaleza como lo hicieron nuestros ancestros o en el laboratorio aplicando técnicas de modelación. Leonardo da Vinci (1452-1519) mencionó hace seis siglos, en forma categórica, gracias a su excelente capacidad de observación, análisis y síntesis: *“Acuérdate, cuando trates del agua, de alegar primero una experiencia antes que una razón”*. Este admirable principio mantiene total vigencia; especialmente cuando se requiere garantizar eficiencia en las obras de saneamiento básico. La necesidad del uso de la modelación hidráulica, como herramienta indispensable para lograr un diseño exitoso de estructuras frecuentemente utilizadas en sistemas de agua potable y alcantarillado.

1.3 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

La modelación hidráulica es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el “modelo hidráulico” deben corresponder a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes, que reciben el nombre de “escalas”.¹ La acertada la selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas de saneamiento básico.

Un modelo hidráulico satisface los requerimientos de la similitud geométrica, de la similitud cinemática y, en último término, de la similitud dinámica. En la mayoría de los casos de la ingeniería hidráulica, no es factible económica ni técnicamente la similitud dinámica completa; sin embargo, es posible y científicamente justificable el utilizar los criterios de la similitud dinámica restringida. Esto significa, que el ingeniero debe seleccionar las fuerzas predominantes en determinado fenómeno hidráulico y

¹OROZCO A. y SALDARRIAGA J. Calibración de modelos hidráulicos. Universidad de los Andes. Colombia. 2005.

garantizar, con el diseño y la operación en el modelo, que exclusivamente dichas fuerzas se encuentran simuladas en la escala correspondiente y en forma apropiada. La técnica que estudia el proceso de selección se denomina Análisis Dimensional y Teoría de la Similitud Dinámica, y forma parte de la ingeniería hidráulica.²

Es inevitable, sin embargo, la existencia de fenómenos de importancia secundaria que en el modelo no pueden ser simulados en forma exacta. Esta aparente limitación en la técnica de la modelación hidráulica se conoce como “efectos de escala”, y marca diferencias entre los resultados del modelo con el comportamiento real en el prototipo. El análisis de los efectos de escala es de igual manera parte relevante de la preparación y de la operación de los ensayos experimentales en laboratorio.

Los problemas para la modelación hidráulica se relacionan con la garantía de la similitud geométrica, cinemática y dinámica. Estos problemas están interrelacionados y, en la mayoría de los casos, la similitud dinámica es única y exclusivamente una consecuencia del grado alcanzado en las similitudes geométrica y cinemática.³

De igual modo, en el caso de los modelos numéricos, el esquema de solución de las ecuaciones planteadas debe ser seleccionado cuidadosamente, considerando el grado de aproximación requerido en los valores experimentales y en las dificultades de estabilidad y convergencia del esquema, los mismos que dependen de los objetivos y del alcance del plan de cálculos y de la meta en la investigación. La comparación de los valores obtenidos por mediciones en la naturaleza, en ningún caso, conduce a una coincidencia absoluta con los valores numéricos obtenidos del modelo. Las hipótesis planteadas para la derivación del sistema de ecuaciones representan, así, los “efectos de escala” de la modelación numérica. En la mayoría de los casos de la modelación física de fenómenos relacionados con saneamiento básico, es decir, fenómenos en donde existe superficie libre del agua o en donde predominan las fuerzas de presión, de gravedad, de viscosidad y de inercia, el criterio de similitud adecuado es el de Froude conjuntamente con un ajuste en la rugosidad del contorno. Este mecanismo permite obtener una similitud aproximada, suficiente para representar los fenómenos en donde

²WITTEWER, ADRIÁN (en español). *Variación de los parámetros característicos de una simulación de la capa límite atmosférica en un túnel de viento*

³FOX ROBERT, *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*, McGraw-Hill

interesa el patrón de flujo y la disipación de energía simultáneamente, como es el caso de las estructuras de cambio de dirección o de nivel. La escala geométrica seleccionada debe permitir esta aproximación adecuada, para lo cual normalmente se requiere que los modelos presenten contornos más lisos que en el prototipo.

1.4 LA MODELACIÓN HIDRÁULICA:

La modelación hidráulica es una ciencia que se basa en principios físicos establecidos, sean éstos los conceptos generales del análisis dimensional o sean aquellos obtenidos por el uso de ecuaciones empíricas en procesos específicos. La base de la modelación es la identificación de las magnitudes predominantes en el fenómeno analizado, se complementa con una correcta selección de la escala y se finaliza con la interpretación de los resultados y su aplicación para obtener la solución del problema real, en donde deben considerarse los denominados “efectos de escala”.⁴

Para alcanzar el éxito en la aplicación de esta ciencia se requiere por lo tanto de buen criterio y vasta experiencia en la selección del método apropiado para identificar la solución eficiente del problema, en la adopción de las restricciones necesarias (que aparecen normalmente en la selección de la escala), en la identificación del plan de pruebas, en la operación del modelo y en el proceso de extrapolación de los resultados para obtener el diseño óptimo de las obras. Una buena parte del éxito en la modelación hidráulica se fundamenta en la justa apreciación y evaluación de todas estas habilidades. De aquí que la modelación hidráulica tiene también mucho de arte.

La selección de la escala para este tipo de modelos representa otro reto importante aún para el investigador experimentado. Se debe llegar a un compromiso entre el tamaño del modelo y el tamaño del material sólido a utilizarse. Normalmente se trabaja con varios modelos de diferente escala, una “familia de modelos”. La confianza en el dimensionamiento de un modelo, en la técnica de mediciones y en los resultados experimentales crece con el tamaño del modelo. No obstante, el costo y las facilidades para el manejo de un modelo grande llegan a ser restricciones importantes. El encontrar un balance apropiado en cada modelo y en cada tipo de simulación forma parte del

⁴ORORIO A. Y SALDARRIAGA. *Calibración de modelos hidráulicos*. Universidad de los Andes. 2005

“arte” del investigador.⁵

1.4.1 Posibilidades de la modelación hidráulica

La literatura técnica sobre modelos hidráulicos, técnicas de modelación y teoría de similitud general, completa y restringida es abundante. Sin embargo, a la fecha, existen aún ciertos grupos de fenómenos hidráulicos importantes, que se los puede catalogar como fenómenos complejos, en donde varias son las fuerzas predominantes y por lo tanto la simulación física requiere de ciencia y arte. Se señalan algunos ejemplos de fenómenos hidráulicos, cuyo análisis justifica plenamente el impulso y desarrollo de la investigación hidráulica aplicada en el país:

a) Obras Hidráulicas

Determinación de la eficiencia de disipadores especiales de energía, de estructuras de separación de caudales en sistemas combinados de alcantarillado, de obras de cambio de dirección y de cambio de nivel, de estructuras de unión y de división de caudales en régimen supercrítico, etc.

Determinación del mecanismo de introducción y de expulsión de aire en flujos a presión y flujos con superficie libre, en estructuras especiales de disipación de energía, de mezcla y de transporte de aguas residuales. Análisis sobre la posibilidad de la modelación numérica del desplazamiento de bolsas de aire, de su estabilización en conducciones a presión.

Determinación de fuerzas y de cargas dinámicas, del mecanismo de interacción flujo estructura en las obras de soporte, del riesgo de vibraciones originadas por el flujo del agua y del aire. Análisis de modelos dinámicos de fuerzas que se originan en flujos aireados, de los efectos de escala en modelos elásticos, con o sin la influencia de masas virtuales (por ejemplo: análisis de la operación de las válvulas de desagüe en los sifones de aducciones de abastecimientos de agua potable).

⁵POTTER C, WIGGERT C. *Mecánica de fluidos*. Editorial Thomson, 2001

b) Cavitación:

Simulación del fenómeno y de la estructura del flujo bifásico, con zonas de cavitación. Diseño y operación de mecanismos para prevenir la cavitación. Análisis de la influencia de la calidad del agua sobre la cavitación.

c) Erosión / Sedimentación

Influencia de la turbulencia y de la floculación en el proceso de sedimentación. Análisis de la sedimentación en conducciones a presión y del mecanismo de limpieza. Definición de profundidades máximas de socavación alrededor de estructuras. Justificación de la modelación por medio de un estudio con una familia de modelos o con varias escalas de diámetros. Análisis de la resistencia del material pétreo o rocoso para su aplicación en canales de rugosidad artificial.

d) Transporte “real” de sólidos

Análisis del flujo de lodos a través de canales o de tuberías a presión. Simulación del transporte de mezclas de arena y material cohesivo. Simulación de problemas morfológicos en cursos naturales o cuerpos receptores de aguas residuales, incluyendo protecciones de orillas, bifurcaciones/derivaciones de colectores, canales y cauces naturales. Interpretación de resultados con diferentes tiempos de operación del modelo y con diferentes tamaños y cohesión de material sólido.

1.5 MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA

El desarrollo de la modelación física, en particular de la modelación fluvial se reporta desde hace 120 años. Sin embargo, hace apenas treinta años se dispone de la posibilidad real de aplicación de la *modelación numérica* debido a un importante renacimiento del análisis numérico, gracias al vertiginoso desarrollo de la técnica de los computadores.

Dentro del ámbito de aplicación de los modelos físicos, se debe considerar que el ingeniero busca a través de ellos lograr una representación simplificada, geoméricamente similar, de un fenómeno de flujo del agua. En ellos no es imprescindible el uso del medio fluido agua, sino que también pueden utilizarse modelos de medio fluido aire o modelos analógicos, donde se aplica la analogía entre las leyes de la mecánica de los fluidos y otros campos de la física.

Desde esta óptica, es entonces importante reconocer como modelo numérico la posibilidad real de lograr los criterios de solución de un determinado problema hidráulico por medio del conocimiento y la formulación de las ecuaciones que describen el fenómeno, de su solución numérica sobre la base de un adecuado algoritmo teórico y de la correcta interpretación de los resultados.

La diferencia fundamental entre los dos tipos de modelación hidráulica radica justamente en esta exigencia sobre el grado de conocimiento o experiencia alrededor del fenómeno. En el caso de la modelación física es suficiente la identificación de fuerzas actuantes más relevantes y de aquí la formulación de los parámetros y del criterio de similitud dinámica restringida.

Existen áreas de la ciencia de la ingeniería hidráulica en donde el desarrollo de la modelación numérica es efectivamente viable y muy importante. Tal es el caso de los problemas alrededor del flujo a presión, de la estimación del perfil de flujo en canales y colectores con superficie libre, de la definición de las características hidrodinámicas de los chorros con geometría simple en el contorno, en procesos de mezcla de aire en la masa de agua, en los análisis de difusión, en aprovechamiento de aguas subterráneas, entre otros más relacionados con el saneamiento ambiental.

1.6 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS REQUERIDAS A LA ENTRADA Y AL PIE DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN

Para iniciar el análisis de las variables que inciden en una estructura especial de cambio de nivel y de dirección, se debe conocer las características del flujo para el que debe ser diseñada. Es importante entonces establecer el mecanismo predominante en el movimiento del agua dentro de la estructura.

En el diseño de una estructura hidráulica se requiere ubicar una sección de control con características de flujo cuasi uniforme en donde se puede aplicar las ecuaciones básicas de la hidráulica. Sin embargo, en sistemas de alcantarillado y específicamente en estructuras en cambio de nivel y de dirección, el flujo de aproximación presenta

variaciones entre el flujo subcrítico y supercrítico como resultado de las diversas condiciones geométricas del proyecto en particular.

Un proceso que se presenta frecuentemente y que debe ser considerado en el análisis del flujo de aproximación, es el ingreso de aire acompañado de un flujo no permanente caracterizado por el caudal pulsatorio. Estos fenómenos están relacionados con la velocidad de flujo generalmente alta, que en la mayoría de casos supere el valor correspondiente al Froude Crítico ($Fr=1$).

A la salida de una estructura de cambio de nivel y de dirección es donde se debe observar el rendimiento hidráulico de la estructura. Se debe prever que el flujo del agua no llegue con velocidad tal que choque sobre el fondo o sobre las paredes laterales.

En algunos, la afectación de la estructura, no se limita únicamente al efecto de abrasión sobre el contorno sólido, que se agrava por la presencia de los materiales sólidos (arenas y gravas) que normalmente son arrastradas por el flujo en sistemas de alcantarillado, sino también a potenciales daños de vibración inducida.

El flujo que se espera a la salida de una estructura de disipación de energía debe ser permanente, con velocidades bajas, sin fluctuaciones de caudal y cuasi uniforme. Adicionalmente, desde el punto de vista sanitario, la estructura final a la salida debería permitir que los sedimentos no se acumulen, evitando el riesgo de azolve o depósito de material sólido en este tramo de la conducción.

1.7 SEMEJANZA GEOMÉTRICA, CINEMÁTICA Y DINÁMICA.

1.7.1 Semejanza geométrica.

En un sentido estricto, la similitud geométrica implica que la proporción de todas las longitudes correspondientes, en los dos sistemas, deben ser las mismas. Así, si ciertas longitudes seleccionadas en las direcciones X, Y Z.

Exige que dentro de la similitud geométrica toda la parte de la máquina ocupada por el flujo se realice a escala en el modelo no solo entre los pasajes de fluidos sino también entre los escurrimientos respectivos dentro de dichos pasajes.

Dos objetos son geoméricamente similares si las razones de sus dimensiones correspondientes son iguales. Por esto la similitud geométrica se refiere solo a similitud de forma.

Entre el modelo y el prototipo existe semejanza geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homólogas en modelo y prototipo son iguales. Tales relaciones pueden escribirse

$$\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}} = L_{\text{rel.}} \text{ o } \frac{L_m}{L_p} = L_r \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{A_{\text{modelo}}}{A_{\text{prototipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}^2}{L_{\text{prototipo}}^2} = L_{\text{rel.}}^2 = L_r^2 \dots\dots\dots(2)$$

1.7.2 Semejanza cinemática.

La similitud cinética dentro los sistemas hidrológicos se debe considerar dos sistemas hidrológicos guardan similitud cinemática si la red de drenaje natural tiene la misma conformación geométrica, esto es, cuando la Relación de Confluencia adopta un valor equivalente o idéntico en ambos sistemas

Dos movimientos son cinemáticamente similares si:

- a) Los patrones de dicho movimiento son geoméricamente similares
- b) Las razones de velocidad de las partículas involucradas en los dos movimientos son iguales

Entre modelo y prototipo existe semejanza cinemática si (1) la trayectoria de las partículas móviles homólogas son geoméricamente semejantes y (2) las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales. A continuación se dan las siguientes relaciones útiles:

$$\text{Velocidad: } \frac{V_m}{V_v} = \frac{L_m / T_m}{L_p / T_p} = \frac{L_m}{L_v} \cdot \frac{T_m}{T_p} = \frac{L_r}{T_r} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Aceleración: } \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m / T_m^2}{L_p / T_p^2} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_p^2}{T_m^2} = \frac{L_r}{T_r^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Caudal: } \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3 / T_m}{L_p^3 / T_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{L_r^3}{T_r} \dots\dots\dots(5)$$

1.7.3 Semejanza dinámica.

La importancia de la similitud dinámica es que dentro del escurrimiento del flujo, las fuerzas que actúan sobre el fluido, deben ser simultáneamente dispuestas, pues si no el fluido sería forzado a seguir trayectorias no similares pese a la similitud de los pasajes fluidos

Dos sistemas hidrológicos son similares dinámicamente si el Coeficiente Orográfico tiene igual o idéntico valor en ambos sistemas. El cumplimiento de las tres condiciones anteriores garantiza la similitud total de los sistemas hidrológicos, que encierran implícitamente similares condiciones de clima, geológicas y hasta de cobertura vegetal.

Dos movimientos son dinámicamente similares si:

- a) Las razones de las masas de los objetos involucrados son iguales
- b) Las razones de la fuerza que afectan al movimiento son iguales.

“Obsérvese que aunque la similitud geométrica y cinemática se pueden lograr en la generalidad de la situaciones del modelaje hidráulico, la similitud dinámica es un ideal que raramente se puede lograr en la práctica” (anónimo 1942)

Entre dos sistemas semejantes geométricos y cinemáticamente existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homólogas en modelo y prototipo son las mismas.

Las condiciones requeridas para la semejanza completa se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton, $\Sigma F_x = M \cdot a$. Las fuerzas que actúan

pueden ser cualquiera de las siguientes, o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitatorias, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas. Entre modelo y prototipo se desarrolla la siguiente relación de fuerzas:

$$\frac{\sum \text{fuerzas (viscosas, de presión, gravitatorias, tensión superf., elásticas)}_m}{\sum \text{fuerzas (viscosas, de presión, gravitatorias, tensión superf., elásticas)}_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p}$$

La relación entre las fuerzas de inercia se desarrolla en la siguiente forma:

$$F_r = \frac{\text{fuerza}_{\text{modelo}}}{\text{fuerza}_{\text{prototipo}}} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m L_m^3}{\rho_p L_p^3} \times \frac{L_r}{T_r^2} = \rho_r L_r^2 \left(\frac{L_r}{T_r}\right)^2$$

$$F_r = \rho_r L_r^2 V_r^2 = \rho_r A_r V_r^2 \dots\dots\dots(6)$$

Esta ecuación expresa la ley general de la semejanza dinámica entre modelo y prototipo y se le conoce con el nombre de ecuación newtoniana.

1.8 PARÁMETROS ADIMENSIONALES

1.8.1 Relación de las fuerzas de inercia a las de presión

(Número de Euler). Viene dada por (utilizando $T = L/V$).

$$\frac{Ma}{pA} = \frac{\rho L^3 \times L / T^2}{p L^2} = \frac{\rho L^4 (V^2 / L^2)}{\rho L^2} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^2} = \frac{\rho V^2}{p} \dots\dots\dots(7)$$

1.8.2 Relación de las fuerzas de inercia a las viscosas

(Número de Reynolds), se obtiene a partir de

$$\frac{Ma}{rA} = \frac{Ma}{\mu \left(\frac{dV}{dy} \right) A} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu \left(\frac{V}{L} \right) L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \dots\dots\dots(8)$$

1.8.3 Relación de las fuerzas de inercia a las gravitatorias.

Se obtiene de

$$\frac{Ma}{Mg} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{Lg} \dots\dots\dots(9)$$

La raíz cuadrada de esta relación, $\frac{V}{\sqrt{Lg}}$ se llama NUMERO DE FROUDE.

1.8.4 Relación de las fuerzas de inercia a las elásticas.

(Número de Cauchy). Se obtiene a partir de

$$\frac{Ma}{EA} = \frac{\rho L^2 V^2}{EL^2} = \frac{\rho V^2}{E} \dots\dots\dots(10)$$

A la raíz cuadrada de esta relación, $\frac{V}{\sqrt{E/\rho}}$, se llama NÚMERO DE MACH.

1.8.5 Relación de las fuerzas de inercia a las de tensión superficial

(Número de Weber). Se obtiene de

$$\frac{Ma}{\sigma L} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} = \frac{\rho L V^2}{\sigma} \dots\dots\dots(11)$$

1.9 TEOREMA II DE BUCKINGHAM.

El teorema II de Buckingham(1) demuestra que, en un problema físico que incluye n cantidades en las que hay m dimensiones, las cantidades se pueden ordenar en $n-m$ parámetros adimensionales independientes. Sean $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ las cantidades implicadas, tales como la presión, viscosidad, velocidad, etc. Se sabe que todas las cantidades son esenciales a la solución, por lo que debe existir alguna relación funcional $F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \dots \dots \dots (4.3.1)$

Si $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots$, representan algunas agrupaciones adimensionales de la cantidades A_1, A_2, A_3, \dots , entonces con m dimensiones implicadas, existe una ecuación de la forma

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \dots \dots \dots (4.3.2)$$

El método para determinar los parámetros Π , consiste en selecciona m de las cantidades A , con diferentes dimensiones, que contengan entre ellas las m dimensiones y usarlas como variables repetitivas, junto con una de las otras A cantidades para cada Π . Por ejemplo, sea que A_1, A_2, A_3 contengan M, L, T no necesariamente en cada una, sino en forma colectiva. Entonces el primer parámetro Π está compuesto como

$$\Pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4$$

El segundo como

$$\Pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5$$

Y así hasta

$$\Pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_n$$

En estas ecuaciones se determinarán los exponentes para que cada Π sea adimensional. Las dimensiones de las cantidades A se sustituyen y los exponentes de M, L, T se fijan iguales a cero respectivamente, estos producen tres ecuaciones con tres incógnitas para

cada parámetro Π , con lo que se pueden determinar los exponentes x , y , z y de aquí el parámetro Π .

Si solo están implicadas dos dimensiones, dos de las cantidades A se escogen como variables repetitivas y se obtienen dos ecuaciones con los dos exponentes incógnitos para cada término de Π .

En muchos casos la agrupación de términos A es tal que el arreglo adimensional es evidente por inspección. El caso más simple es aquel cuando dos cantidades tienen las mismas dimensiones, por ejemplo, longitud, la razón de estos dos términos, siendo el parámetro Π .

1.10 CONDICIONES DE SIMILITUD

El principio de similitud consiste en aceptar que las conclusiones obtenidas del análisis de un fenómeno son aplicables a otro fenómeno. Por ejemplo, del estudio del salto hidráulico que ocurre en un modelo se pueden obtener conclusiones aplicables al salto hidráulico que ocurre en la naturaleza.

Cuando esto es cierto se dice que ambos fenómenos son similares. El modelo no puede ser simplemente una imitación de la naturaleza. Tampoco puede ser una representación física de un modelo matemático. El modelo debe contener alguna de las cualidades del prototipo que trata de representar. Así por ejemplo, en el modelo de un salto hidráulico, esta la igualdad del número Froude, con un grado aceptable de turbulencia, y además, la similitud geométrica.

Las condiciones de la similitud que se utilizan en los modelos hidráulicos, se obtienen a partir de los números de Reynolds y Froude.

1.11 SIMILITUD DE REYNOLDS

Establece que dos flujos no afectados por la gravedad son dinámicamente semejantes si los números de Reynolds son iguales.

NUMERO DE REYNOLDS

Este número recibe su nombre en honor a Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo escribió en 1883. Viene dado por la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} = \frac{v_s D}{\nu}$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

v_s : Velocidad característica del fluido [m/s]

D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido [m]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [N.s/m²]

ν : Viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

El número de Reynolds es la razón entre las fuerzas de inercia y las viscosas. Para que exista la similitud de Reynolds de cumplirse que:

$$Re_m = Re_p$$

Donde:

Re m: Número de Reynolds del modelo

Re p: Número de Reynolds en el prototipo

1.12 SIMILITUD DE FROUDE

Establece que dos flujos de fluidos no afectados por fuerzas viscosas son dinámicamente semejantes si los números de Froude son y permanecen iguales. (Editorial Schaun “Mecánica de Fluidos e Hidráulica”)

NÚMERO DE FROUDE

Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido.

$$Fr^2 = \frac{v^2}{gl}$$

Donde:

l = parámetro de longitud [m]

v = parámetro de velocidad [m/s]

g = aceleración de la gravedad [m/s^2]

Para que exista la similitud de Froude de cumplirse que:

$$Fr_m = Fr_p$$

Donde:

Fr_m : Número de Froude del modelo

Fr_p : Número de Froude en el prototipo

Esta similitud tiene gran importancia donde existen flujos a superficie libre, en la práctica, la similitud de Froude puede ser aplicada si los flujos en los dos sistemas son del tipo turbulento rugoso cuidando que una condición suplementaria relativa a la rugosidad sea cumplida.

1.13 ESCALA EN MODELOS HIDRAULICOS

Cuando se planifica una investigación en modelos hidráulicos, se busca reproducir de la mejor manera y del modo más completo posible las condiciones que se encuentran en la naturaleza. Esto no siempre es posible ya que la naturaleza es demasiado compleja y su reproducción total nunca puede lograrse. Debido a la complejidad de la naturaleza, el camino a seguir es el de la simplificación de tal manera que se pueda reproducir un aspecto o una parte de algún fenómeno y tratar de obtener la mayor semejanza posible.

En la hidráulica existe la ventaja que la mayoría de sus modelos pueden representarse físicamente a escala. A través de los años se ha desarrollado la teoría de modelos, que consiste en aceptar y aplicar el principio de semejanza. Una de las grandes ventajas de los modelos hidráulicos y a su vez su dificultad es que cada modelo a la vez de representar su prototipo, es en si el prototipo. Lo que implica que un modelo no es una maqueta.

En la teoría de los modelos físicos se habla frecuentemente del prototipo para referirnos a aquello que se va a estudiar. Por lo tanto, para la selección de escalas se requiere no sólo el conocimiento de las circunstancias teóricas aplicables, sino también de las vinculadas al laboratorio en el que se va a realizar la investigación tales como espacio disponible, capacidad de bombas, precisión de instrumento a utilizarse y muchos

factores más. Lo que implica que la escala tiene poco que ver con tal que se guarde el principio de similitud.

El establecimiento de las condiciones de frontera es sumamente importante y requiere de mucha experiencia. Como consecuencia de las escalas escogidas, puede ocurrir que aparezcan ciertos fenómenos distintos que no corresponden a lo que se presentan en la naturaleza. Estos fenómenos propios del modelo y de la escala escogida reciben el nombre de efectos de escala. Al respecto hay que tener cuidado, por ejemplo, con los fenómenos originados por la tensión superficial, propia del modelo y no del prototipo.

El criterio de similitud escogido, la selección de escalas, la determinación de los límites del modelo y la consideración de los efectos de escala son de primerísima importancia para interpretar adecuadamente los resultados del modelo.

1.13.1 Efectos de escala

Los efectos de escala pueden definirse como las distorsiones introducidas por factores como viscosidad, tensión superficial, diferentes del que predomina como la gravedad. Estos ocurren cuando uno o más de los parámetros dimensionales son diferentes entre el modelo y el prototipo.

Por ejemplo en un desbordamiento por encima de un vertedero, el fluido se encuentra sujeto a alguna resistencia viscosa a lo largo de la cara de aguas arriba. Sin embargo la resistencia no afecta en forma significativa al flujo por encima de la cresta, los efectos viscosos son pequeños y la relación caudal – cabeza puede ser deducida como se haría para el flujo de un fluido ideal. En flujos de superficie libre, el efecto gravitacional es dominante. Si se utiliza el mismo fluido, tanto en el modelo como en el prototipo, es imposible mantener al mismo tiempo los números de Froude y de Reynolds.

1.14 TIPOS DE MODELOS HIDRAULICOS

El modelo de cualquier elemento hidráulico como un canal o captación puede ser construido con fronteras fijas o móviles dependiendo de las respuestas que se espera obtener del modelo, tomando en cuenta este criterio existen dos tipos de modelos:

1.14.1 Modelodefondomóvil

Se utiliza comúnmente cuando es muy importante el movimiento de materiales que componen el fondo de un canal y los taludes. Este tipo de modelos pueden emplearse para abarcar los siguientes problemas:

- Morfología de ríos, cambios de pendiente y de secciones transversales, arrastre de sedimentos
- Encauzamiento de ríos, eliminación de curvas, reubicación de canales.
- Desarrollo de llanuras de inundación.
- Ubicación y diseño de pilas de puentes
- Cruce de tuberías.

1.14.2 Modelos de fondo fijo

Para estudios de ríos o canales en los que no es importante el movimiento del fondo, puede emplearse un modelo no distorsionado o distorsionado, dependiendo de las características del flujo que se desea representar. Se recomienda el uso de un modelo no distorsionado si el estudio involucra la reproducción de un flujo súper crítico, transiciones, patrones de onda o perfiles de la superficie del agua. Si se desea reproducir la capacidad de almacenamiento, entonces el empleo de un modelo distorsionado resulta.

El uso de un modelo no distorsionado representa para un modelador un mínimo de problemas en su diseño y análisis. En un modelo con escalas distorsionadas, la dificultad radica en asegurar que el modelo sea lo suficientemente rugoso para que no se distorsione la conversión de energía cinética a potencial y viceversa. En relación con los modelos de fondo fijo, el diseño y la operación de un modelo de fondo móvil es más complejo.

2 CAPITULO II

2.1 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

2.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

Analizar las condiciones del flujo de aproximación en la cámara helicoidal, así también como las condiciones del flujo subcritico en la cámara helicoidal y las condiciones del flujo a superficie libre en la cámara de entrada. Adicionalmente, determinar las bases diseño hidráulico y dimensionamiento estructural para el vertedero a vórtice.

2.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Se realizará una recolección y revisión de la información técnica básica para la ejecución del proyecto, se deberá seleccionar la escala del modelo así también como sus condiciones de similitud dinámica y otras relaciones que se determinarán por medio de los distintos ensayos en el laboratorio. Se dimensionará y construirá el modelo hidráulico, se elaborará un plan de pruebas y las respectivas curvas de diseño.

2.4 SIMILITUD Y SELECCIÓN DE LA ESCALA DEL PROYECTO

Para la selección de la escala se debe tomar en cuenta ciertos factores determinantes como lo es el espacio físico disponible, el tiempo pre destinado a la elaboración del mismo y el presupuesto destinado a dicho proyecto.

En el vertedero a vórtice, las fuerzas naturales predominantes para el movimiento helicoidal son las de inercia y gravedad, es por esto que se determina que el modelo funcionará con el criterio de la similitud de Froude.

Para este modelo se ha seleccionado la escala de 1:18 para minimizar los efectos combinados de tensión superficial y viscosidad. Ciertas fuentes citan que se debe mantener una escala menor a 1:20 para lograr esta condición. Por lo tanto este modelo lo satisface.

Este modelo hidráulico está construido de acrílico en todas las partes de conducción de agua, para este material, la rugosidad está en el orden de 0.0015mm y el coeficiente de rozamiento “n” está en el orden de 0.010.

Dadas estas condiciones, se obtiene que los valores para el número de Froude en este modelo estén por debajo de 1, esto implica que el flujo es de tipo subcrítico. Es decir que el flujo es no turbulento y sin mayores fluctuaciones en la superficie libre de agua.

2.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO EN EL LABORATORIO

Descripción de las estructuras de entrada, del modelo y de las obras complementarias

Generalidades sobre la instalación

A continuación se pasa a describir cada una de las partes de que está constituido el modelo hidráulico.

Foto No.1: En esta fotografía se puede apreciar la fachada del bloque “F” en el campus sur de la Universidad en donde se encuentran ubicadas las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica en donde se trabajó en los modelos hidráulicos.



Gráfico 1 Laboratorio de Hidráulica

Foto No. 2

En esta fotografía se puede observar la mesa de tres niveles que será utilizada en el modelo hidráulico del vertedero a vórtice, en la mesa inferior se colocará el tanque de carga y la bomba, en la mesa intermedia se observa el tanque de disipación el mismo que tiene dos tabiques verticales y en la mesa superior se observa el tanque de carga que se dispone antes del vertedero a vórtice.



Gráfico 2 Mesa de trabajo

Foto No. 3

En esta fotografía se puede observar el tanque superior el que ira conectado por medio de una tubería de P.V.C. de 1 pulgada al vertedero a vórtice, se puede observar también los apoyos y el orificio en donde ira colocado el vertedero a vórtice. Cabe señalar que la mesa superior será recubierta con papel contag tanto en la parte superior como en la parte inferior. Los orificios en los tanques de carga se realizarán mediante un taladro utilizando la cuchilla circular.



Gráfico 3 Tanque superior

Foto No. 4

En esta fotografía se puede observar el vertedero a vórtice que se encuentra encima de un escritorio con la finalidad de captar su geometría la cual tiene un canal de entrada rectangular, el caracol en donde el flujo de agua es inducido a tener un movimiento helicoidal y al final la tubería por donde el agua baja apegado a sus paredes debido a la fuerza centrífuga inducida en la parte superior.



Gráfico4 Vertedero a vórtice

Foto No. 5

En esta fotografía se puede observar el vertedero a vórtice en la posición definitiva, nótese que en la parte inferior de la mesa los soportes de madera ayudan a la correcta posición del vertedero a vórtice. Con la finalidad de dar la correcta geometría al vertedero se construyó un molde en madera con las dimensiones previamente obtenidas en función del caudal que se tendrá en el modelo hidráulico.

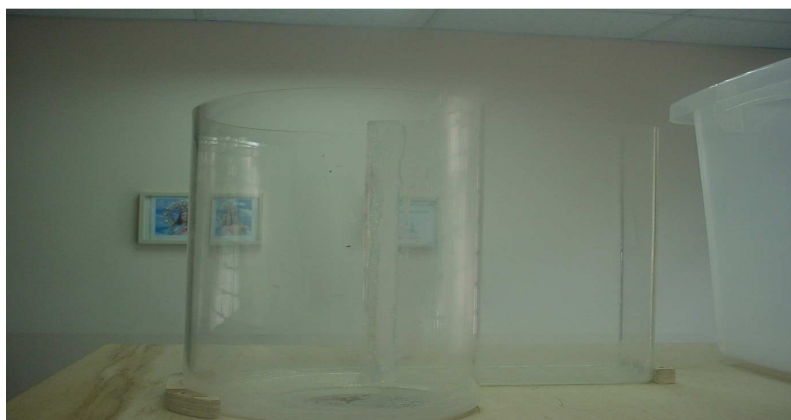


Gráfico5 Vertedero a vórtice en posición final

Foto No. 6

En esta fotografía se puede observar el vertedero a vórtice de frente en la parte posterior se encuentra el tanque de carga. Con la finalidad de regular la cantidad de agua que ingrese al vertedero a vórtice se colocará una llave de paso debido a que se debe regular la cantidad de agua para poder obtener la curva de descarga.

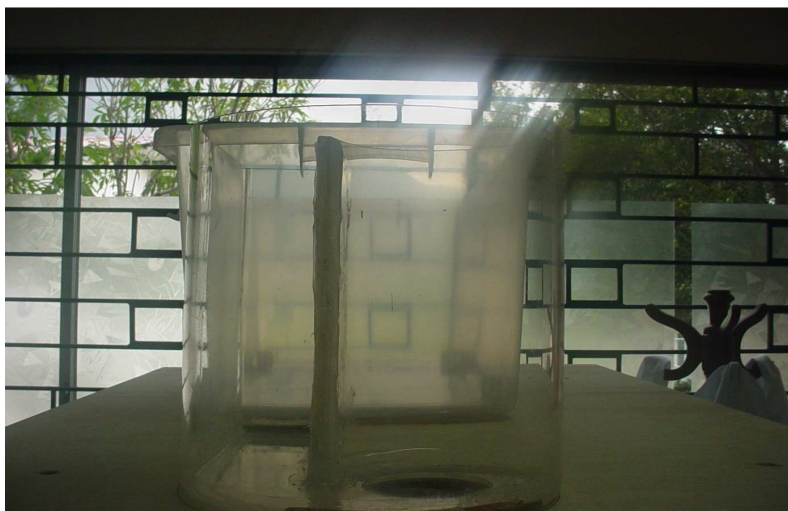


Gráfico6 Vertedero a vórtice posición frontal

Foto No. 7

Se puede apreciar la ubicación de la bomba en el sistema de recirculación, hay que tomar en cuenta que este modelo hidráulico tiene un tanque en la parte superior que garantiza la cantidad de agua que ingresará en el vertedero a vórtice.

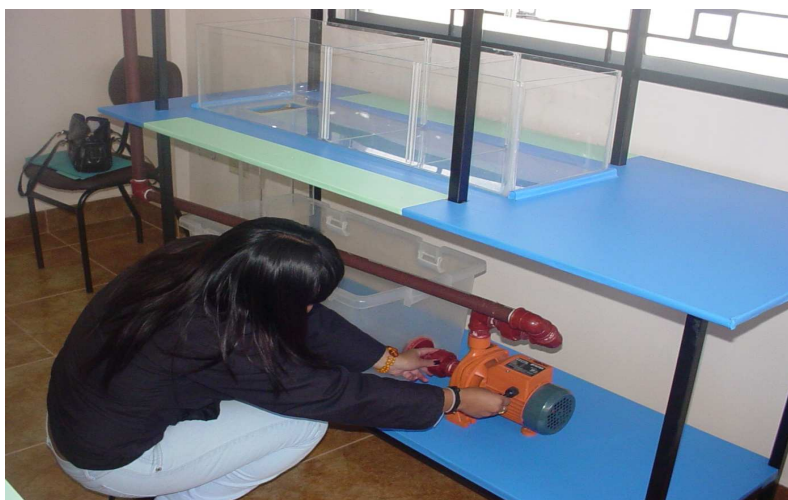


Gráfico7 Bomba de recirculación

Foto No. 8

En la parte inferior del vertedero a vórtice se puede observar el cuenco de disipación una vez que el flujo de agua se desplaza por la tubería circular en movimiento circular, una vez que funcione el modelo se podrá verificar que el flujo de agua se desplaza apegado a las paredes laterales.



Gráfico 8 Cuenco de disipación

Foto No. 9

Se puede apreciar la ubicación de la válvula que regula el paso de agua desde el tanque superior al vertedero a vórtice, el diámetro de esta válvula es de una pulgada y el momento de las pruebas del modelo se tendrá diferentes aperturas de la misma.



Gráfico 9 Válvula de control

Foto No. 10

Se colocó una universal en la tubería que conecta la bomba de recirculación con el tanque superior, esto con la finalidad de poder trasladar el modelo hidráulico de un lugar a otro con toda facilidad.



Gráfico 10 Adecuaciones de la tubería

Foto No. 11

Se puede observar una vista panorámica del vertedero a vórtice tanque inferior, zona de disipación, tanque superior y el vertedero a vórtice.



Gráfico 11 Vista panorámica del vertedero a vórtice

Foto No. 12

La bomba que se dispuso en este modelo es de un caballo de potencia debido a que el modelo tiene el tanque superior desde el cual abastece de agua al vertedero a vórtice



Gráfico 12 Vista panorámica vertedero a vórtice



Gráfico 13 Tanque superior de carga



Gráfico 14 Tanque de dosificación



Gráfico 15 Tanque de recogida



Gráfico 16 Modelaje hidráulico vertedero a vórtice

3 CAPITULO III

3.1 GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PLUVIAL O COMBINADO.

Las estructuras de disipación de energía en sistemas de alcantarillado son de vital importancia especialmente cuando se desea vencer grandes diferencias de nivel en distancias muy cortas. Existen varios tipos de estructuras de disipación entre las cuales tenemos:

- Pozos con caída libre
- Canal de pendiente fuerte con lecho disipador
- Vertedero a Vórtice

En la siguiente figura observamos la trayectoria de cada una de las alternativas propuestas anteriormente. Cada una de estas tiene sus ventajas y desventajas que serán analizadas posteriormente y que son de importancia para poder seleccionar la mejor alternativa.

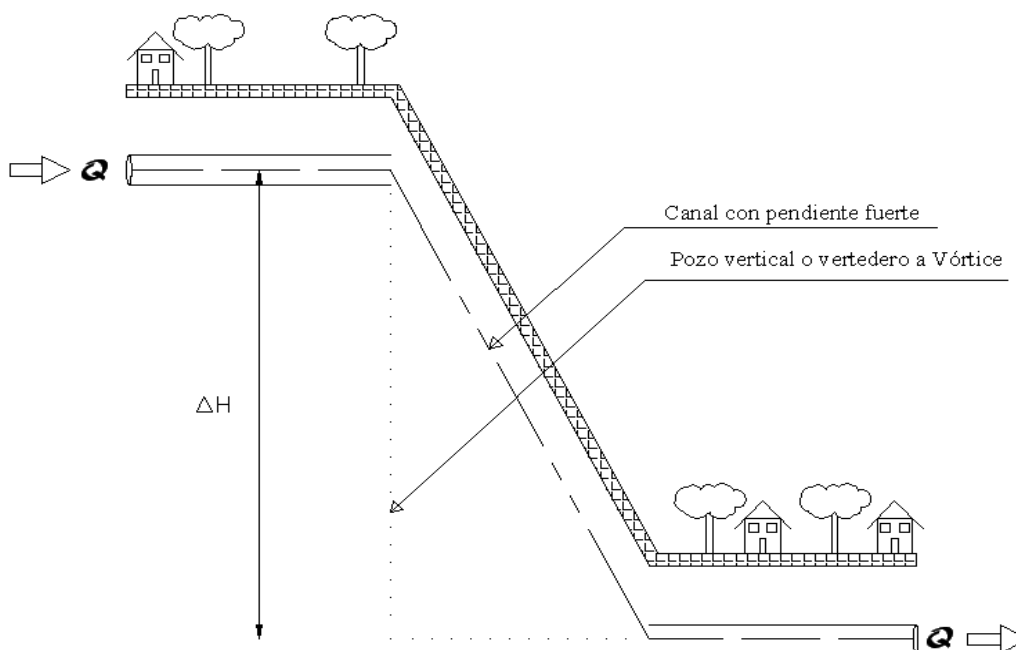


Gráfico17 Cambios bruscos de nivel

3.1.1 Pozo con caída libre

Puede ser de sección rectangular o circular, se caracteriza por un choque del agua en su parte superior contra un bloque diseñado para este propósito o contra la pared del pozo en sí, el agua luego del choque es guiada por conducto vertical e impacta con una masa de agua en la parte inferior, esta masa de agua se denomina colchón de aguas y es el lugar donde se disipa la energía para entregar un flujo estable en el colector inferior.

La ventaja de este tipo de disipador es su fácil construcción pero su desventaja es el control del flujo tanto en el conducto vertical como en el colector inferior además de la cantidad de ruido y abrasión que esta estructura genera.

3.1.2 Canal de pendiente fuerte con lecho disipador

Este tipo de disipador de energía requiere de una construcción con materiales de alta resistencia a la abrasión. Debido a los grandes avances de la ingeniería, esto es algo muy sencillo de conseguir hoy en día. La aplicación de este tipo de disipadores es muy frecuente debido al alto conocimiento que se tiene sobre esta estructura y sobre la interacción agua-aire que hacen posible el control y la regulación.

3.1.3 Vertedero a Vórtice

Este tipo de disipadores de energía no son muy comunes en el Ecuador ya que hasta finales de los años ochenta no se conocía mucho sobre su funcionamiento y construcción sin embargo se han hecho muchos estudios internacionalmente sobre su funcionamiento.

El vertedero a vórtice se caracteriza por tener un canal de aproximación para conducir las aguas recolectadas hacia la cámara de entrada que se encarga posteriormente de transportar el flujo hasta el tubo vertical. Esta sección de la estructura es la más importante ya que por su forma, hace que el agua viaje con

una trayectoria helicoidal. Luego el flujo continúa por una cámara de disipación que se ubica abajo del tubo vertical, este se encarga de enviar un flujo, cuya energía ya fue disipada, al colector de salida.

3.2 OBJETIVOS DE LA DISPOSICIÓN DEL VERTEDERO A VORTICE

Una de las características de los sistemas de alcantarillado en zonas con una topografía irregular es la presencia de cambios de nivel asociados con cambios de dirección, en regímenes de velocidades altas y dimensiones geométricas relativamente importantes. Inclusive para el caso de flujos de aproximación en régimen subcrítico, la dificultad de encontrar una solución técnica es relevante por la poca disponibilidad de espacio para el desarrollo de estructuras comunes de salto con perfiles hidrodinámicos o con disipadores normales de energía al pie.

El problema que se presenta para obtener una solución técnica adecuada, en particular para zonas urbanas y que permita salvar un desnivel grande con un cambio de dirección al pie, está asociado con los requerimientos de:

- Evitar la presencia de remansos o embalsamientos de agua
- Eliminar las perturbaciones de nivel o de la superficie libre
- Disminuir la acumulación de sólidos o azolve
- Eliminar la obturación por elementos disipadores
- Eliminar la abrasión
- Eliminar ruido durante su operación
- Permitir la circulación de aire
- Eliminar la presencia de flujo inestable hacia aguas debajo de la conducción
- Evitar las sobrecargas de profundidad de agua extraordinarias

Para conducir las aguas de un sistema de alcantarillado en forma controlada a un nivel inferior y en una dirección diferente a la del canal de aproximación, se presenta entonces como alternativa apropiada la disposición de un vertedero a vórtice.

Esta estructura hidráulica se caracteriza porque induce un movimiento helicoidal en el ingreso a un pozo vertical de caída y este movimiento helicoidal se mantiene pegado a

lo largo de toda la pared interior del tubo vertical, provocando durante el descenso de la lámina una disipación de energía debido a la fricción y a la doble curvatura de las líneas de corriente. Debido a la presencia garantizada de un núcleo de aire, el flujo de caída helicoidal es estable y de entrega en una cámara al pie, en donde se procura disipar la energía residual.

Entre las ventajas hidrodinámicas asignadas a esta estructura, al cabo de varias decenas de años de estudios en modelos y en prototipos, se señalan como las más importantes:

- Posibilidad de descargar caudales del orden de 100 m³/s y en desniveles de hasta los 100m
- Garantía de flujo estable en el movimiento helicoidal
- Ausencia de presiones negativas en el interior del tubo vertical
- Ausencia de ruido en el movimiento de caída
- Aireación adecuada de la lámina en el núcleo
- Disminución y/o eliminación de olores desagradables
- Mínimo de energía remanente al pie
- Garantía de flujo controlado y regulado en la salida del desnivel
- Posibilidad de control eficiente en las crecidas

Como se indica en la siguiente figura, el vertedero a vórtice consta de las siguientes estructuras componentes:

- Canal de entrada
- Cámara espiral
- Tubo vertical
- Cámara de disipación
- Canal de entrega

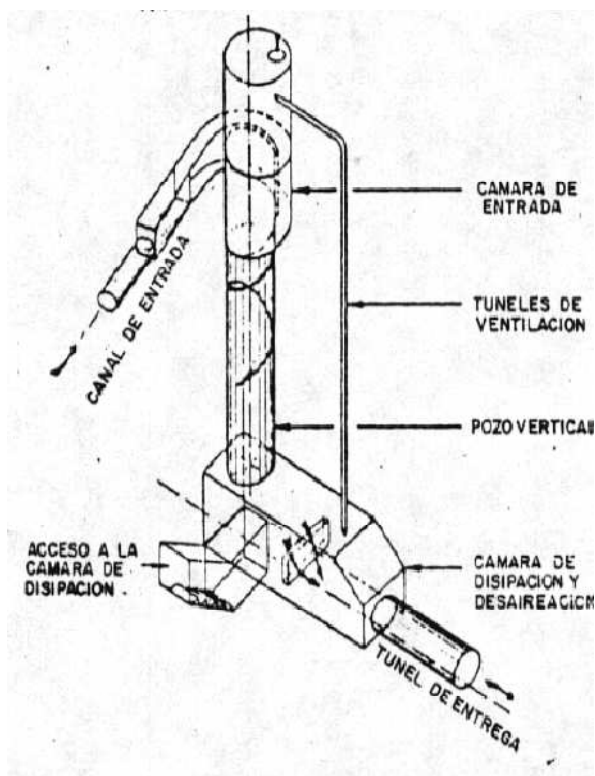


Gráfico18: Elementos de un vertedero a vórtice

La disposición de un vertedero a vórtice en los sistemas de alcantarillado ha sido analizada desde el punto de vista de su versatilidad para servir como estructura de unión de dos o más colectores. En la siguiente figura se muestra un esquema de esta posibilidad como solución técnica y económica a uno de los problemas más graves en el desarrollo de redes de colectores.

A continuación se hará una breve descripción de los requerimientos hidráulicos de cada uno de los componentes para lograr los criterios de su dimensionamiento básico. Si bien su uso es amplio y de la relativa facilidad, la disposición incorrecta por ejemplo, de la cámara espiral de inicio del tubo vertical o el dimensionamiento inapropiado del diámetro de este tubo, podría originar una grave deficiencia en su operación.

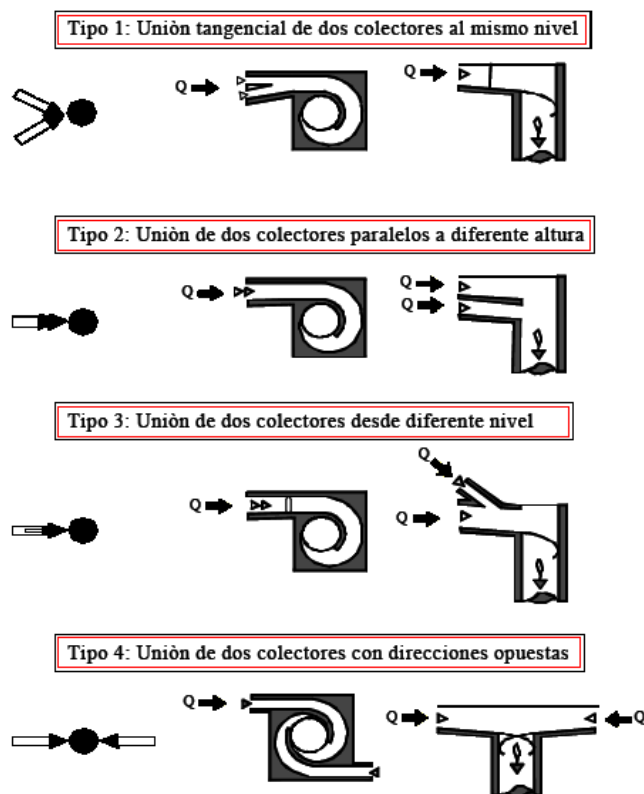


Gráfico19Tipos de unión de colectores

3.3 DEFINICIONES Y CARACTERISTICAS DE TIPOS DE VERTEDEROS A VORTICE

Existen en principio, dos tipos de configuraciones de los vertederos a vórtice, en función del tipo de régimen en el canal de aproximación, es decir para flujos subcríticos y supercríticos. Inicialmente se diferenciaban los tipos de vertederos a vórtice según la forma en planta de la cámara de entrada, es decir circular, caracol, espiral, tangencial y por sifón.

En el caso del diseño de los vertederos a vórtice para sistemas de alcantarillado, es de particular interés el chequeo de la eficiencia de la estructura para toda la serie de caudales de operación. En este sentido, es de importancia el análisis del funcionamiento de la obra para caudales pequeños, de tal modo que el flujo helicoidal se origine y se mantenga, así como que la estructura sea eficiente respecto de la disipación de energía. Aspectos relacionados con la suficiente ventilación para los caudales máximos, con el mantenimiento del núcleo de aire estable y con la expulsión del aire introducido a lo largo del movimiento helicoidal tienen segunda prioridad en el diseño hidráulico.

3.3.1 Canal o colector de entrada

El tipo de flujo que se garantiza en este canal determina las características y la eficiencia de la estructura del vertedero a vórtice. El flujo es subcrítico o lento si el número de Fr es menor a 1 en el canal, en caso contrario, cuando el Fr es mayor a 1, se presenta el flujo supercrítico o torrencial.

Si bien se puede dimensionar la estructura para condiciones de flujo a presión en el canal de entrada, es recomendable garantizar flujo a superficie libre para todos los caudales de la serie en los sistemas de alcantarillado. De igual modo, es recomendable que el colector de entrada tenga una sección rectangular para permitir la transición adecuada al flujo helicoidal. En ciertos casos, el ancho del canal debe ser variable, menor en la sección final antes de la cámara de entrada para generar una aceleración que permita una buena condición de inicio en el movimiento helicoidal y de igual modo, que la lámina de agua para caudales pequeños se mantenga junto a la pared interior del tubo vertical.

En el caso del flujo subcrítico en el canal de entrada, se recomienda que $Fr < 0,75$, por razones de estabilidad. Las características hidrodinámicas en el canal de llegada serán controladas por la descarga del tubo vertical, desde aguas abajo. Se debe chequear que la incidencia de la geometría del vertedero a vórtice afecte en el menor grado el flujo de aproximación.

Si se trata de una canal de entrada con flujo supercrítico, se recomienda que $Fr \geq 1,3$. Es importante analizar en este caso que las velocidades altas de circulación en el canal de entrada originan sobre elevaciones importantes de la superficie libre de agua en el cambio de dirección al inicio del flujo helicoidal, y permiten la mezcla intensa de aire en la masa de agua. El diseño geométrico de la zona de transición hacia la cámara de entrada es importante, cualquier perturbación será transportada hacia aguas abajo con la consecuente afectación a la calidad del flujo de caída.

3.3.2 Cámara de entrada

En el caso del flujo subcrítico de aproximación, la geometría de la cámara está dada común y básicamente por una configuración de caracol. La siguiente figura muestra el esquema y en corte, con las definiciones de las variables geométricas

$$D = \eta \times \sqrt[5]{\frac{Q^2}{g}}$$

D = Diámetro del pozo

Q = Caudal del diseño

g = Aceleración de la gravedad

η = Co eficiente de flujo o parámetro de forma, que para la geometría de la cámara varía entre $0.83 \leq \eta \leq 2.00$

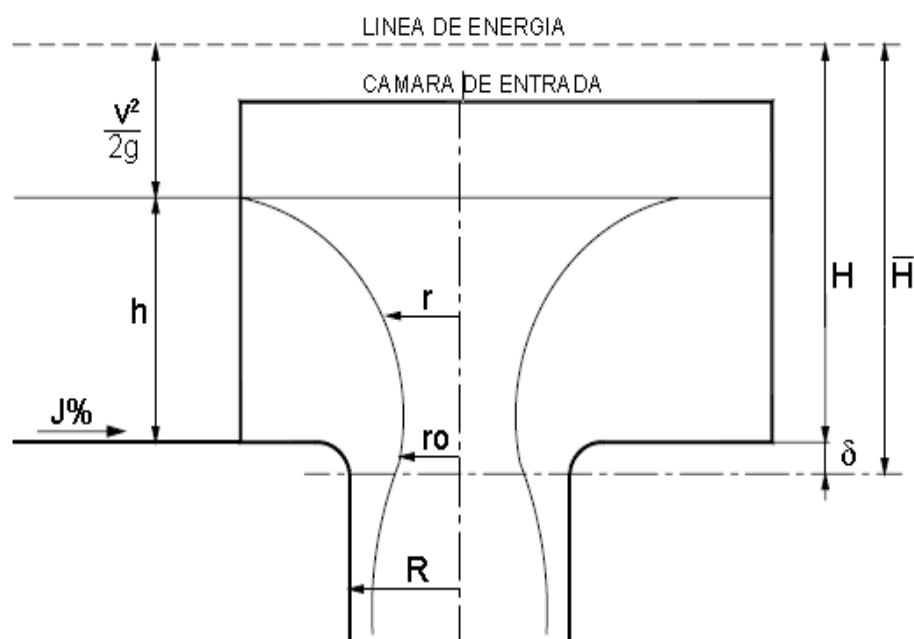


Gráfico20 Línea de energía en cámara de entrada

La altura del nivel de superficie libre en la cámara es de interés. Las teorías propuestas establecen una relación directa entre la profundidad de agua “h” en la cámara y el caudal “Q”. Según las experiencias de Viparelli esta profundidad de agua queda prácticamente constante a lo largo de las paredes de la cámara. Se admite entonces que las pérdidas de carga por rozamiento en la cámara de entrada son despreciables; se adopta una línea de energía horizontal como se muestra en la figura 20.

En esta misma figura se presenta el esquema de las obras así como la notación utilizada

Las principales condiciones que debe cumplir la cámara de entrada son las siguientes:

- a) Mantener un núcleo de aire en el pozo vertical
- b) Ubicación constante del nivel de superficie libre en el canal de aproximación y en la cámara.
- c) Flujo libre de pérdidas en las obras de entrada.
- d) En la cámara de entrada se tiene un flujo circular $V = \text{constante}$.

El flujo en la cámara de entrada se define según Viparelli mediante el sistema de 3 ecuaciones simultáneas:

$$Q = \mu \times \pi \times R^2 \sqrt{2g(h - \delta)}$$

$$\frac{1}{\mu} = \sqrt{\alpha + \left(\frac{\pi \times R^2}{L \times h} \right) \times \left[\beta \times \left(\frac{\Delta}{R} \right)^2 - 1 \right]}$$

$$\frac{1}{ro^2} = \frac{2g(h + \delta)}{0.50 \left(\frac{Q^2}{L^2 \times h^2} \right)} + \frac{1}{0.50 \times \Delta^2}$$

Donde:

Q = Caudal de diseño

R = Radio de pozo vertical

μ = Coeficiente de descarga

h = Altura del nivel del agua en la cámara de entrada

L = Ancho del canal de aproximación

Δ = Distancia entre el eje del pozo y eje del colector previo a la cámara de entrada

g = Aceleración de la gravedad

Las dimensiones de la cámara de entrada (ver figura 18) están definidas por las ecuaciones que se indican a continuación:

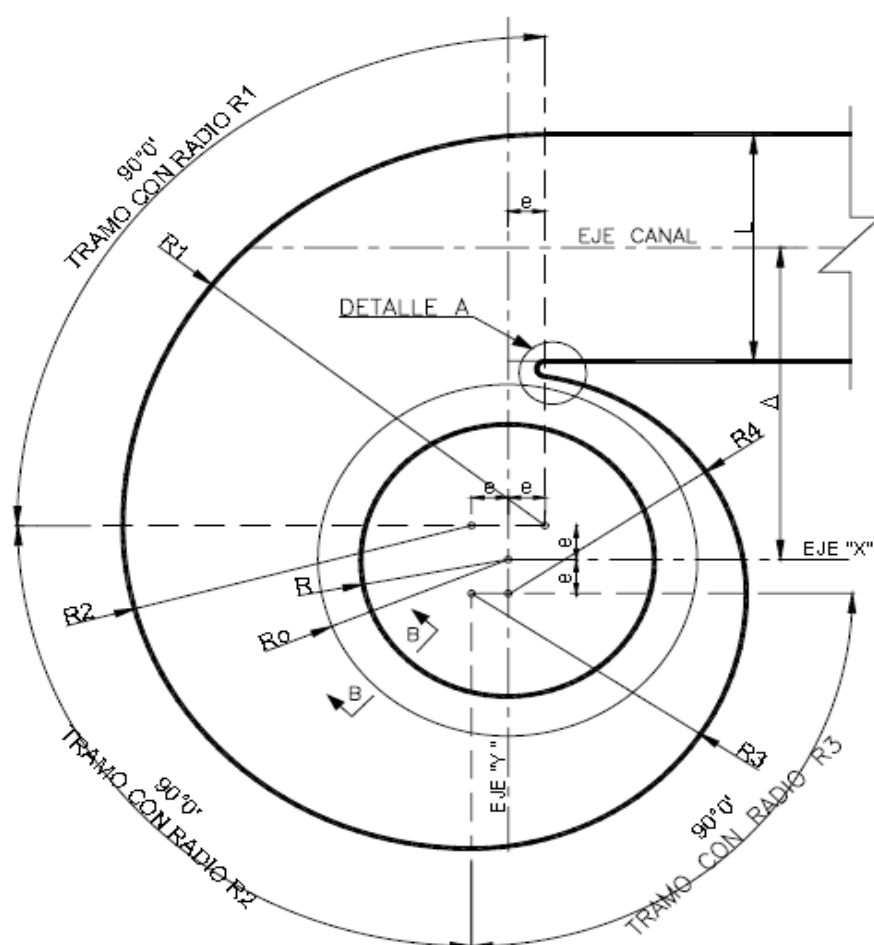
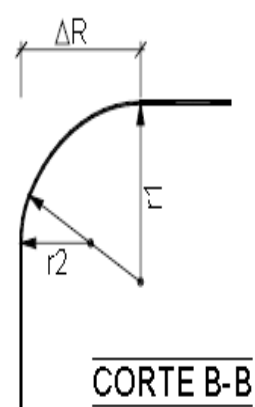
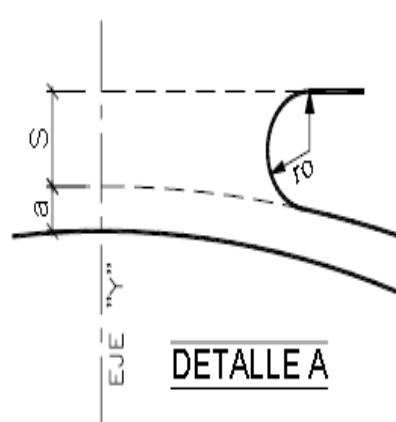


Gráfico21 Geometría de la Cámara de entrada



$$\Delta = R1 + e - \frac{B}{2}$$

$$R1 = R + \Delta R + a + 6e$$

$$R2 = R1 - 2e$$

$$R3 = R1 - 4e$$

$$R4 = R1 - 5e$$

$$ro = \frac{(R4 + s)^2 - (R^2 - e^2)}{2(2R4 + s)}$$

$$L1 = a + 5e + R \quad L2 = 2 * L1$$

El significado geométrico de las variables calculadas con las ecuaciones se observa en la figura 21

3.3.3 Dimensionamiento del pozo vertical

El diámetro del pozo se determinará mediante la expresión experimental, indicada en el numeral anterior. La condición de diseño del pozo es garantizar que el flujo helicoidal permanezca en toda su longitud manteniendo siempre el núcleo de aire, para estabilizar la lámina de descende pegada a la pared. La trayectoria helicoidal alarga sensiblemente la longitud que la lámina recorrerá hasta llega a la cámara de disipación que se ubica al pie.

LE flujo helicoidal, caracterizado por una alta velocidad, disipa la energía debido a la fricción del flujo con las paredes y al continuo cambio de dirección. L velocidad vertical que alcanza la partícula del flujo crece hasta una denominada “velocidad limite”; cuando la velocidad llega hasta este límite, la energía cinética del flujo permanece constante.

$$V_{\infty} = \sqrt[3]{\frac{8 * Q * g}{\pi * D * \lambda}}$$

Donde:

V_{∞} = Velocidad límite

Q = Caudal del diseño

g = Aceleración de la gravedad

D = Diámetro del pozo vertical

λ = Coeficiente de fricción

CUADRO DE VELOCIDAD LÍMITE PARA DIFERENTES CAUDALES Y RUGOSIDADES

	$Q(m^3/s)$	13.50	12.50	11.50	9.80	6.00	3.50	2.00
λ	0.020	19.15 m/s	18.67 m/s	18.16 m/s	17.21 m/s	14.62 m/s	12.21m/s	10.13m/s
λ	0.025	17.78 m/s	17.33 m/s	16.85 m/s	15.98 m/s	13.57 m/s	11.34m/s	9.41 m/s
λ	0.030	16.73 m/s	16.31 m/s	15.86 m/s	15.04 m/s	12.77 m/s	10.67m/s	8.85m/s

3.3.4 Dimensionamiento de la cámara de disipación

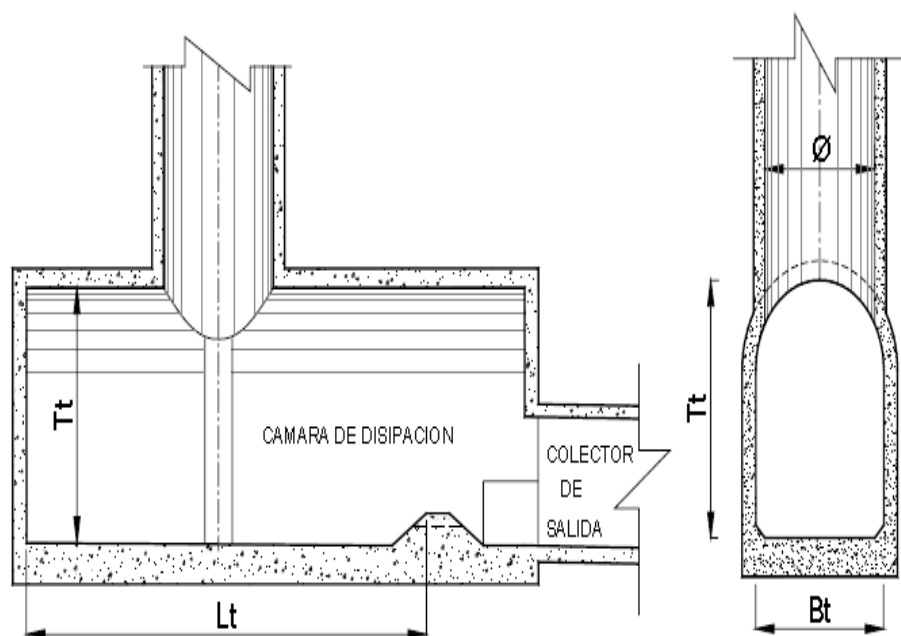


Gráfico22Geometría de la cámara de disipación

La cámara de disipación es una estructura cuyo principal objetivo es lograr la transformación de la energía residual del flujo al pie del pozo vertical. Para lograr este objetivo es necesario que en esta cámara se forme un colchón de agua, en el cual se logre disipar la energía remanente no disipada en el pozo.

Las dimensiones recomendadas por la literatura técnica para la cámara de disipación (ver figura 22) son:

$$L_t \cong 4.D \qquad 1 \leq \frac{B_t}{D} \leq 1.2 \qquad T_t = 2.D$$

L_t = Longitud de la cámara de disipación

B_t = Ancho de la cámara de disipación

T_t = Altura de la cámara de disipación

Estas dimensiones pueden parecer excesivas; sin embargo se requiere suficiente espacio para disipar la energía. Si el volumen de la cámara es demasiado pequeño, el pozo puede sumergirse, y el insuficiente flujo de aire podría generar flujo pulsatorio en dos fases, cavitación y flujo invertido de aire.

Si bien hasta un 90% de energía puede ser disipado en el pozo del vórtice, un colchón de agua en la cámara de disipación es necesario para proteger el fondo de la cámara. Para formar este colchón se propone un vertedero a la salida de la cámara.

3.4 CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO VÓRTICE

3.4.1 Datos Previos

Q (m ³ /s) =	11.50 (caudal de diseño)
J (%) =	0.40 (pendiente de aproximación)
B (m) =	2.00 (ancho neto)

3.4.2 Dimensionamiento de cámara de entrada y tubo vórtice

η =	1.40 (valor asumido)
D_{cal} (m) =	2.36 (diámetro del pozo)

Dasum (m) =	2.40 (diámetro del pozo)
R (m) =	1.20
δ (m) =	0.25 (valor asumido)
δ/R =	0.104 (0.10-0.20).
ΔR (m) =	0.35 (asumido)
s (m) =	0.100 (asumido)
a (m) =	0.1 (asumido)
e (m) =	0.300
Ro (m) =	1.55
Δ (m) =	2.75 (R1 + e –B/2)
R1 (m) =	3.450 (R + Δr + a + 6e).
R2 (m) =	2.850 (R1 – 2e)
R3 (m) =	2.250 (R1 - 4e)
R4 (m) =	1.950 (R1 – 5e)
ro (m) =	$0.061 [(R4 + s)^2 - (R4^2 - e^2)] / [2(2R4 + s)]$
L1 (m) =	2.800 (a + 5e + R)
L2 (m) =	5.600 (2L1)

Condiciones Geométricas

$$1.1 R < \Delta - \frac{L}{2}$$

$$1.32 < 1.75$$

$$\frac{Ro}{R} \geq 0.5$$

$$1.29 > 0.5$$

3.4.3 Dimensiones de la cámara de disipación al pie del pozo vertical

	Calculado	Asumido
Longitud (m) =	9.60	10.00
Ancho (m) =	2.75	2.80
Altura (m) =	3.96	4.00
J (%) =	0.40	

CÁLCULO DEL SISTEMA DE ECUACIONES DE VIPARELLI

δ (m) =	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Δ (m) =	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
L (m) =	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
R (m) =	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Q (m ³ /s) =	13.5	12.5	11.5	9.8	6	3.5	2

h (m) =	3.152	2.841	2.560	2.102	1.260	0.804	0.517
ro (m) =	0.493	0.573	0.617	0.710	0.946	1.060	1.118
ω (m) =	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
ξ (m) =	0.411	0.477	0.514	0.592	0.788	0.883	0.931
α (m) =	1.448	1.677	1.849	2.370	6.956	20.743	56.785
β (m) =	1.795	1.689	1.631	1.511	1.240	1.125	1.072
μ (m) =	0.365	0.355	0.342	0.319	0.244	0.170	0.114
Q (m ³ /s) =	13.50	12.50	11.50	9.80	6.00	3.50	2.00
ro/R =	0.411	0.477	0.514	0.592	0.788	0.883	0.931

3.4.4 Tubo vertical o pozo

El diámetro del tubo vertical se calcula mediante la relación empírica

$$D_s = h^*(Q_d^2 / g)^{1/5}$$

En donde el factor h depende de la geometría de la cámara de entrada varía entre 0,83 y 2. En el caso de los modelos ensayados previamente, se determina que el valor de $h = 1,25$ es recomendable para los dos tipos de aproximación. El valor de

Q_d representa el caudal de diseño, para el cual queda determinada toda la geometría de la estructura.

Adicionalmente es interesante conocer el valor del caudal máximo (Q_{max}) que puede ser admitido por el tubo vertical, sin que se produzca una grave reducción en el núcleo de aire y se mantenga la presión atmosférica en la superficie libre del flujo helicoidal.

Para el caso del flujo de aproximación subcrítico:

$$Q_{max} = 4 \cdot (D_s/2)^3 \cdot (5g/b)^{1/2}$$

Para la serie de caudales inferiores a este valor Q_{max} es posible determinar la curva de descarga con respecto a la profundidad de flujo en el canal de entrada mediante una relación funcional de la forma:

$$Q/Q_0 = (\pi \cdot (2h)^{1/2}) / (1/\mu^2 - (\pi D_s/2ah)^2)^{1/2}$$

Siendo μ el coeficiente de contracción característico del tipo de cámara de entrada y con el valor de:

$$\mu = 0.95 - (1/\mu^2 - (1-2y/9\pi)^{2/3})^2$$

donde $y = h/h_0$

$$h_0 = aD_s/2b$$

$$Q_0 = (ga \cdot D_s^5/32b)^{1/2}$$

Para el caso del flujo de aproximación supercrítico:

Debe considerarse que el control desde la entrada al tubo vertical desaparece y que las condiciones hidrodinámicas dependen exclusivamente del radio de curvatura de las paredes de la cámara espiral. Aparece una onda permanente en la pared interior, ubicada en la sección a_M , que produce una elevación de la superficie libre igual a h_M , como se esquematiza a continuación.

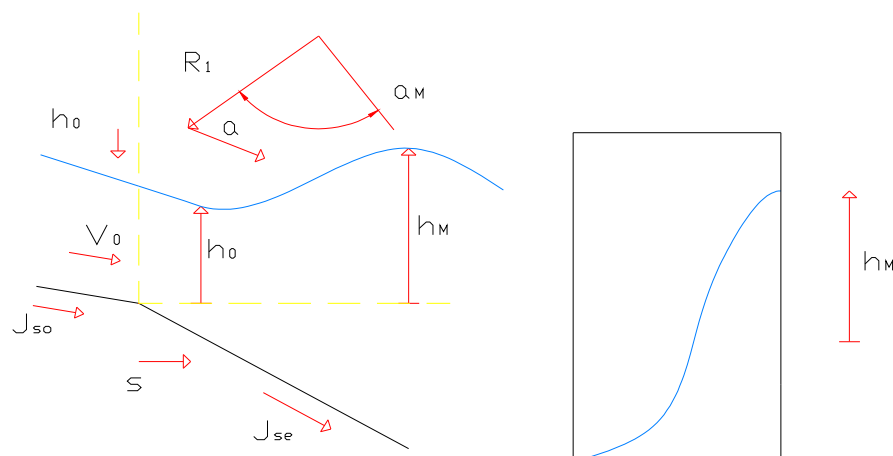


Figura 20: Perfil longitudinal y sección transversal para flujo supercrítico

El valor de la sobre elevación h_m se evalúa con la relación experimental:

$$h_m/R_1 = (0.15Fr_0 + 1.1) * ((Fr_0 * 2bh_0^2/R_1^3) - J_{so}/2)$$

Y la ubicación de la sobre elevación se determina por:

$$a_m/Fr_0 = 75 * (h_0/R_1)^{1/2}$$

La altura de la pared requerida para la cámara de entrada espiral queda determinada entonces por estas relaciones empíricas, comprobadas satisfactoriamente con los ensayos en los modelos.

3.4.5 Cámara de disipación al pie

Los principales objetivos que deben ser satisfechos por esta cámara al pie del tubo vertical, considerando que el vertedero a vórtice está en una red de alcantarillado, son los siguientes:

- Garantizar la estabilidad del flujo helicoidal de caída proporcionando la ventilación suficiente del núcleo de aire en el tubo vertical
- Disipar la energía residual al pie del tubo vertical

- Permitir que el flujo de ingreso al colector de entrega sea homogéneo y estable
- Permitir el cambio de dirección entre los colectores de llegada y de salida del vertedero a vórtice
- Ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel

Entre otros aspectos muy importantes. La geometría básica de la cámara es:

$$S_t / D_s \approx 4$$

$$B_t / D_s \approx 2$$

$$T_t / D_s \approx 2$$

Sibienestas longitudes parecen excesivas, se demostró que son necesarias para garantizar la estabilidad del flujo aguas abajo.

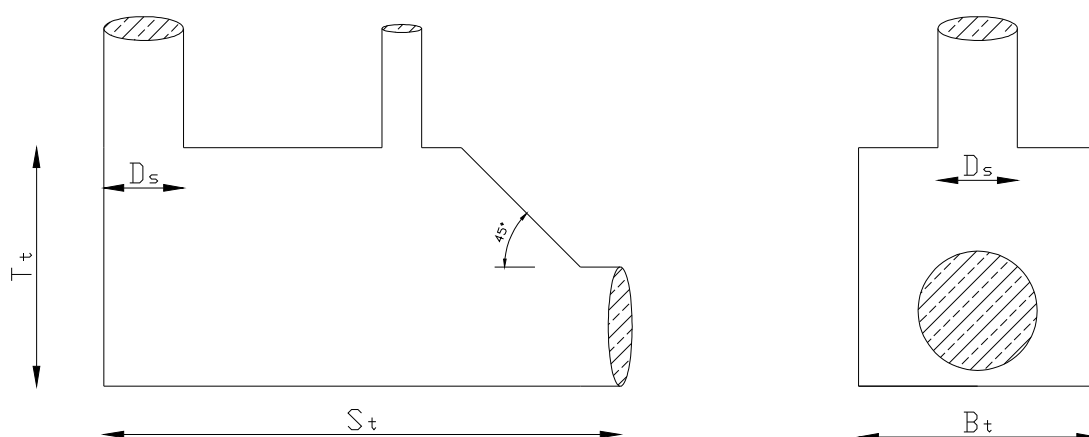


Gráfico23: Cámara de disipación al pie

En el interior de la cámara se deben disponer obstáculos como los señalados en la siguiente figura para conseguir una adecuada disipación de energía y las condiciones para el flujo estable y homogéneo aguas abajo.

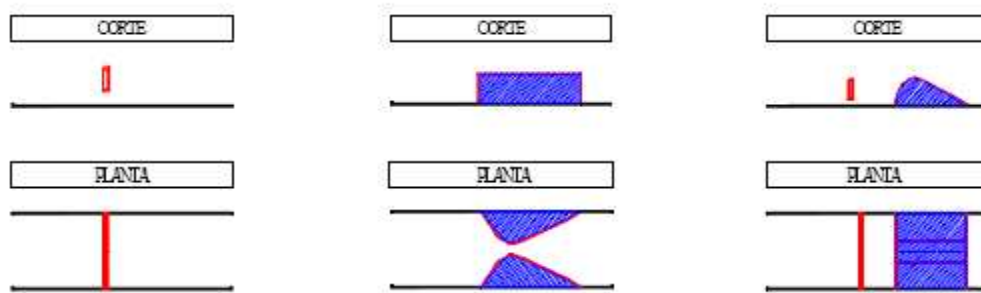


Gráfico 24: Variantes para mejorar la disipación de energía

Es importante señalar la inclinación de 45° en la pared de aguas debajo de la cámara, lo que permite la exclusión del aire antes de su ingreso al canal de entrega y su adecuada expulsión a través del tubo de aireación, en el caso de que sea necesario. Normalmente en los sistemas de alcantarillado, no se requiere la expulsión total del aire de la mezcla.

3.4.6 Colector de entrega

Aún cuando cerca del 90% de la energía es disipada en el vertedero a vórtice por los cambios de nivel y de dirección del flujo principal, existe el requerimiento para que el flujo a lo largo del colector de entrega aguas abajo mantenga un caudal no pulsatorio de una mezcla homogénea de agua y de aire. Este requerimiento es mayor, si es que el canal de entrega continúa en régimen supercítico, dado que toda perturbación en la sección inicial del colector se transporta aguas abajo.

La transición entre la cámara de disipación y el colector debe ser en todo caso abocinada y debe disponer de la ventilación suficiente para garantizar que la separación del flujo sea definida y permanezca estable en una sola superficie. En ciertos casos, se ha dispuesto de un estrechamiento artificial en la sección final de la cámara, para permitir que el flujo sea controlado en esta sección fija.

El colector de salida puede tener cualquier forma de sección transversal; sin embargo debe ponerse especial cuidado en la configuración de transición entre la pared de aguas debajo de la cámara y el colector del vertedero a vórtice.

4 CAPITULO IV

4.1 SISTEMA DE MEDICION Y TOMA DE DATOS

En todo el modelo existen diversas regletas con el fin de poder obtener las mediciones de las alturas de agua. Todas las regletas están en centímetros y milímetros por lo que nuestro grado de exactitud es milimétrico.

Necesitamos también para los diversos experimentos medir caudales. Para esto disponemos de un recipiente de 1 litro y de un cronómetro. De esta manera colocamos el recipiente debajo del tubo vertical, tomamos el tiempo (en segundos), desde que cae la primera gota hasta que el recipiente llegue a una medida conocida cualquiera. Realizamos la división y obtenemos nuestro caudal en [Lt / s].

Con el fin de medir la carga de velocidad en vertedero a vórtice, disponemos de tubos Pitot, estos son instalados de manera manual en cualquier punto en el que se desee saber la carga de velocidad. Se toma la lectura en centímetros.

4.2 PLAN DE PRUEBAS

Se realizarán un total de 3 ensayos de laboratorio distintos con el modelo del vertedero a vórtice. Los distintos experimentos tienen como finalidad la comprobación de que el flujo helicoidal en el tubo vertical no se desprenda sin importar las diversas condiciones hidráulicas.

Los datos a tomarse para cada uno de los experimentos son los siguientes:

- Volumen en recipiente para medir caudales [Lt]
- Tiempo de llenado del volumen en recipiente para medir caudales [s]
- Carga de velocidad en el canal de entrada [cm]
- Carga de velocidad al entrar al vertedero a vórtice [cm]
- Carga de velocidad al salir del vertedero a vórtice [cm]
- Altura de sobre elevación en el canal de entrada (h1) [cm]
- Altura de sobre elevación al entrar al vertedero a vórtice (h2) [cm]

- Altura de sobre elevación al salir del vertedero a vórtice (h_3) [cm]
- Ubicación del desprendimiento de la lámina descendente dentro del tubo vertical (en caso de existir).

4.3 DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LABORATORIO

4.3.1 Ensayo de laboratorio #1:

El primer ensayo de laboratorio se lo realiza con flujo libre. Esto implica que debemos sacar la compuerta de regulación de caudales del canal de entrada.

El primer paso es llenar el tanque de reserva de la bomba hasta el máximo con agua. Después procedemos a encender la bomba para llevar el agua hasta el tanque de carga.

Procedemos a abrir la llave de paso inferior del tanque de carga para poder realizar las calibraciones respectivas.

Una vez que el tanque de carga se encuentre a un 90% de su capacidad máxima, debemos utilizar el regulador de nivel para lograr la condición de que la cantidad de agua en el tanque de carga sea constante. Para esto debemos mover la perilla de la izquierda para enviar parte del flujo de vuelta al tanque de reserva de la bomba y mover también la perilla derecha para limitar la cantidad de agua que entra al tanque de carga.

Al obtener la condición de altura de agua constante en el tanque de carga se procede a realizar la medición del volumen del recipiente para medir caudales y su respectivo tiempo de llenado.

Procedemos a observar el flujo de agua descendente por el tubo vertical y verificamos si existen desprendimientos y si el flujo sigue el movimiento helicoidal.

Procedemos a realizar las mediciones de carga de velocidad por medio del tubo Pitot y de altura de sobre elevación en los tres puntos propuestos (h_1 , h_2 , h_3).

4.3.2 Ensayo de laboratorio #2:

El segundo ensayo de laboratorio se lo realiza con flujo mínimo. Esto implica que la compuerta de regulación de caudales del canal de entrada está cerrada dejando el paso de un caudal mínimo de agua.

De la misma manera, el primer paso es llenar el tanque de reserva de la bomba hasta el máximo con agua. Después procedemos a encender la bomba para llevar el agua hasta el tanque de carga.

Procedemos a abrir la llave de paso inferior del tanque de carga para poder realizar las calibraciones respectivas.

Una vez que el tanque de carga se encuentre a un 90% de su capacidad máxima, debemos utilizar el regulador de nivel para lograr la condición de que la cantidad de agua en el tanque de carga sea constante. Para esto debemos mover la perilla de la izquierda para enviar parte del flujo de vuelta al tanque de reserva de la bomba y mover también la perilla derecha para limitar la cantidad de agua que entra al tanque de carga.

Al obtener la condición de altura de agua constante en el tanque de carga se procede colocar la compuerta de regulación de caudales totalmente cerrada. Después se procede a realizar la medición del volumen del recipiente para medir caudales y su respectivo tiempo de llenado.

Procedemos a observar el flujo de agua descendente por el tubo vertical y verificamos si existen desprendimientos y si el flujo sigue el movimiento helicoidal.

Procedemos a realizar las mediciones de carga de velocidad por medio del tubo Pitot y de altura de sobre elevación en los tres puntos propuestos (h_1 , h_2 , h_3).

4.3.3 Ensayo de laboratorio #3:

El tercer ensayo de laboratorio se lo realiza con flujo promedio. Esto implica que la compuerta de regulación de caudales del canal de entrada está abierta una cantidad “x” dejando el paso de un caudal promedio de agua.

De la misma manera, el primer paso es llenar el tanque de reserva de la bomba hasta el máximo con agua. Después procedemos a encender la bomba para llevar el agua hasta el tanque de carga.

Procedemos a abrir la llave de paso inferior del tanque de carga para poder realizar las calibraciones respectivas.

Una vez que el tanque de carga se encuentre a un 90% de su capacidad máxima, debemos utilizar el regulador de nivel para lograr la condición de que la cantidad de agua en el tanque de carga sea constante. Para esto debemos mover la perilla de la izquierda para enviar parte del flujo de vuelta al tanque de reserva de la bomba y mover también la perilla derecha para limitar la cantidad de agua que entra al tanque de carga.

Al obtener la condición de altura de agua constante en el tanque de carga se procede colocar la compuerta de regulación de caudales a una abertura “x” escogida por el laboratorista.

Después de proceder a realizar la medición del volumen del recipiente para medir caudales y su respectivo tiempo de llenado.

Procedemos a observar el flujo de agua descendente por el tubo vertical y verificamos si existen desprendimientos y si el flujo sigue el movimiento helicoidal.

Procedemos a realizar las mediciones de carga de velocidad por medio del tubo Pitot y de altura de sobre elevación en los tres puntos propuestos (h_1 , h_2 , h_3).

4.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez que el modelo del vertedero a vórtice fue armado y todas sus fugas fueron mitigadas, se procedió a realizar los ensayos planteados en el capítulo anterior, el análisis de dichos resultados los veremos a continuación.

4.4.1 Tanque de carga y Cámara de entrada

En el tanque de carga, resulta bastante sencillo conseguir la condición de caudal constante, es nada más una sincronía entre las 2 llaves de salida y las 2 llaves de paso del regulador de nivel para el tanque de carga.

En la cámara de entrada se observa un flujo estable sin turbulencias. De la misma manera, se observa una sobre elevación al ingresar al vertedero a vórtice. Dicha sobre elevación se da debido a la fuerza centrífuga, dicha fuerza es característica en el movimiento helicoidal.

4.4.2 Tubo vertical

Para todas las condiciones citadas anteriormente, es decir flujo libre, flujo mínimo, y flujo máximo se observa la inexistencia de un desprendimiento de la lámina de agua descendente. Esto se debe a la carencia de presiones negativas. Lo que implica que tenemos un flujo helicoidal estable a lo largo del tubo vertical. Existe disipación de energía debido a la fricción y circulación de aire a lo largo del eje del tubo.

4.4.3 Cámara de disipación al pie

En la cámara de disipación al pie observamos un choque, de la lámina de agua descendente, no violento. Esto confirma la disipación de energía por medio de la fricción. En la vida real, la cámara de disipación al pie puede contener estructuras de hormigón destinadas a garantizar un flujo controlado e inofensivo para el canal de conducción, (Figura 20).

5 CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES

- Los patrones de flujo en cada elemento de la estructura descargador a vórtice se ajustan a lo previsto como hipótesis del diseño y del dimensionamiento geométrico.
- La cámara de entrada es el elemento que ejerce control en el flujo del canal de aproximación determinado el régimen en el que este se encuentra (subcrítico) para caudales bajos se observa que el control que ejerce la cámara de entrada alcanza a la mitad del canal de entrada, mientras que para caudales medios y altos se aprecia que la cámara de entrada ejerce pleno control en el flujo del canal a pesar de las condiciones impuestas en la transición a la entrada del modelo.
- Para la gama de caudales considerados como ejemplos de la estructura se observa la presencia del núcleo de aire establece tanto en el tubo vertical como en la cámara de entrada, garantizando así el flujo helicoidal y por ende la disipación de energía en estructura.
- Experimentalmente se determina el caudal límite de funcionamiento del modelo, en el cual se pudo observar que en el núcleo de aire formando en la cámara de entrada se desplaza del eje central, debido a las grandes magnitudes de las fuerzas centrífugas e inerciales actuantes para esta condición.
- Para el flujo subcritico se recomienda la aplicación de las estructuras descargadores a vórtice como disipadores de energía pues se aprovecha la altura de caída para lograr una disipación parcial de la energía con la que la cámara al pie requiere de menores dimensiones, adicionalmente el flujo desciende controlado.

- La configuración de la cámara de disipación, para caudales bajos y medios garantiza la formación del colchón de aguas que aporta a la disipación de energía residual del flujo.
- Se recomienda, como obra complementaria, la construcción de un ducto de ventilación para garantizar la presencia de la presión atmosférica en la parte posterior de la cámara de disipación y estabilizar el flujo en esta zona.

5.2 RECOMENDACIONES

- Debido a las características especiales de las zonas andinas puede presentarse flujo supercrítico en algunos colectores, la estructura recomendable para solucionar el problema de cambios de nivel y/o dirección con aproximación supercrítica es el descargador a vórtice. No obstante, se debe poner especial atención a que el flujo supercrítico no es controlado en la sección aguas abajo y que debe garantizarse por lo tanto que el flujo de aproximación supercrítico sea estable, libre de ondulaciones, sin problemas de aireación entre otros.
- El descargador a vórtice presenta un buen funcionamiento para toda la gama de caudales considerados como ejemplo. Se recomienda realizar investigaciones para optimizar el diseño de la cámara de disipación, en cada caso particular.
- Para pequeños desniveles se recomienda realizar investigaciones en la configuración de la cámara de entrada del descargador a vórtice para disminuir la altura máxima requerida del tubo vertical para lograr la eficiencia adecuada de la estructura en el grado de disipación de energía. Las modificaciones podrían realizarse en la cámara de entrada tanto para flujo subcrítico como supercrítico.
- En caso de estructuras hidráulicas de control, la simulación del flujo de agua en un modelo físico a escala reducida exige que se cumplan los tres tipos de similitud; geométrica, dinámica y cinemática.

- La técnica de modelación de modelación física de estructuras hidráulicas es ampliamente conocida y difundida en el medio técnico nacional e internacional. Sin embargo, también es reconocido que la construcción y la operación de modelos físicos exigen del ingeniero diseñador, en primer lugar, un profundo conocimiento de las bases, de los criterios de similitud, de la tecnología en la construcción y en la operación de la estructura en el laboratorio y sobre todo, en segundo lugar, de una experiencia garantizada del ingeniero operador para la interpretación de las observaciones y del procedimiento de los resultados experimentales.
- La técnica de la modelación hidráulica es muy eficiente para la preparación de los criterios de dimensionamiento como para la obtención y procesamiento de los parámetros adimensionales más relevantes en el proceso de optimización de estructuras con geometría simple pero involucran fenómenos hidráulicos complejos.

5.3. BIBLIOGRAFIA

- a) Hager, W.H., Kellenberger, M.H.: “Die Dimensionierung des Wirbelfall”
- b) Schachtes. GWF-Wasser-Abwasser, 128, Heft 11, 1987.
- c) Jain, A.K. et al: “Air Entrainment in Radial Flow Towards Intakes”, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol.104, No.7, June 1978
- d) Kleinschroth, A.: “Der Abflußvorgang im Wirbelfallsgacgt”. Der Bauingenieur, Nr.47, 1972
- e) Ackers, P.; Crump, E.S: “The Vortex Drop”. Proceedings of Civil Engineering, p.433-442, 1960
- f) Bretschneider, H.: “Zur Berechnung von kreisförmigen Fallschächten”. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der RWTH, Aachen. Mitteilung Nr.13, 1960.
- g) Hager, W.H.: “Head-Discharge Relation for vortex Shaft”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.111, No.6, June 1985
- h) Hartl, J.: “Zur Hydromechanik des Drallschachtes”. Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 35, Heft 9/10, 1983
- i) Jain, S.C.; Kenndy J.F.: “Vortex-Flow Drop Structures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District Inline Storage System”. Iowa Institut of Hydraulic Research, Report No.264, 1983
- j) Kleinschroth, A., Wirth, H.: “Dimensionnierung von Wirbelfallschächten unter Berücksichtigung verschiedener Zuflußbedingungen”. Institut für Hydraulik und Gewässerkunde an der Th München, Motteilungen Nr. 36, München, 1981